青藏高原积雪变化及其影响

车 涛[1,2*] 郝晓华[1] 戴礼云[1] 李弘毅[1] 黄晓东[3] 肖 林[4]

1 中国科学院西北生态环境资源研究院 甘肃省遥感重点实验室 中国科学院黑河遥感试验研究站 兰州 730000
2 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心 北京 100101
3 南京信息工程大学 南京 210044
4 四川农业大学 成都 611130

摘要 青藏高原积雪具有特殊的自然属性，是"亚洲水塔"的重要组成部分，其空间分布特征与变化不仅是天气和气候变化的产物，也会对全球和区域变化产生显著的影响。文章通过多种遥感数据分析了青藏高原积雪时空分布及变化特征，并探讨其水文与气候效应。结果表明：（1）青藏高原积雪主要分布在山区，其中唐古拉山和念青唐古拉山积雪最丰富，多年平均积雪日数在120天以上，年平均雪深超过10 cm；高原腹地平坦地区及柴达木盆地积雪属于瞬时积雪，多年平均积雪日数小于15天，年平均雪深小于1 cm。（2）1980—2018年，青藏高原积雪呈下降趋势，尤其在2000年以后，积雪覆盖日数和雪深明显下降。（3）高原内积雪较多的山脉地区可以产生较大的积雪辐射强迫，最大可超过15 W m^{-2}，其反照率反馈机制对气候系统的影响至关重要。（4）青藏高原是多条大江大河的发源地，积雪融水是春季土壤水分和河川径流的重要补给。（5）受天气过程产生的雪灾频次有所增强，建立早期预警和防护措施是减少牧区雪灾损失的重要手段。

关键词 青藏高原，积雪，水资源，气候变化，雪灾

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.2019.11.007

积雪是冰冻圈的重要组成要素，是地球系统科学研究中不可或缺的变量。在气候变化研究中，积雪作为关键气候变量（ECV），它的季节变化是导致地表反照率变化最为显著的因素，进而引起地气能量收支平衡和区域水平热力差异。在全球水循环过程中，积雪的积累和消融过程起到水的年内再分配作用，是干旱半干旱地区春季最重要的淡水资源。准确掌握积雪面积和深度的时空分布对全球和区域气象预报与气候预测、水文模拟与预报、水资源管理等具有重要科学意义。

以青藏高原为主体的高亚洲被称为地球的第三极，是气候变化的敏感区和热点，其积雪时空变化影

* 通讯作者
资助项目：第二次青藏高原综合科学考察研究（2019QZKK0201），国家自然科学基金（41771389、41971325、41971293）
修改稿收到日期：2019年10月6日

响全球气候变化，同时也是全球气候变化的敏感指示器。青藏高原及周边地区，平均海拔超过 4 000 m，是诸多大江大河的发源地，被称为“亚洲水塔”[1]。其积雪水储量关系着所在区域及周边区域的生活和灌溉用水，积雪变化影响高原及周边区域的植被生长，是生态环境变化中的关键环节。

青藏高原积雪分布以高海拔特征为主，有明显的垂直地带性，与高纬度地区的积雪有明显的不同。青藏高原空间异质性强，稳定积雪和瞬时性积雪同时存在，年积雪覆盖日数从超过 200 天到小于 5 天都存在，雪深最大可超过 1 m，最小可小于 1 cm，因此贫雪干旱和雪灾并存。在季节变化上也与高纬度地区存在差异。积雪发生的时间具有较大的不确定性，大部分地区春秋季多、冬季少，并且积累—稳定—消融的过程短且多。因此青藏高原积雪变化对气候、水文的影响与高纬度地区不同。

文章首先利用遥感数据分析青藏高原积雪的空间分布及时间变化特征，然后针对积雪变化产生的水文和气候效应进行阐述，最后对青藏高原牧区雪灾进行分析。

1 青藏高原积雪空间分布特征

为了获取长时间序列的积雪空间分布信息，采用 1980 年以来美国 NOAA-AVHRR 地表反射率数据提取积雪覆盖信息，采用 SMMR、SSM/I 和 SSMIS 被动微波亮度温度数据反演雪深信息。其中 AVHRR 数据集来源于美国国家环境信息中心①，它由 NOAA-7、9、11、14、16、17 和 18 卫星搭载的 AVHRR 辐射计获取的辐射数据经过一系列的地理提取、辐射校正以及大气校正后得到地表反射率数据和亮温数据。被动微波数据来源于美国国家冰雪数据中心②，数据主要进行交叉定标以获取长时间序列稳定的亮度温度数据[2]。

积雪覆盖识别算法主要采用 AVHRR 的第二和三波段的 3 个组合变量，利用高分辨率遥感数据提取积雪真值，从而建立 AVHRR 判别积雪的指标体系和阈值，最终获取了1980—2016 年 5 km 逐日积雪覆盖数据集[3]。雪深反演首先利用 18 GHz、22 GHz、36 GHz 的亮度温度组合对积雪进行识别，然后利用 18 GHz 和 36 GHz 的亮度温度差与雪深之间的关系反演得到 1980—2018 年 25 km 逐日雪深数据集[4]。

根据“1980—2016 年 5 km 逐日积雪覆盖数据集”提取青藏高原 1980—2016 年多年平均积雪覆盖日数（SCD）（图 1）。结果显示青藏高原积雪分布异质性较强。其中柴达木盆地和青藏高原西南部积雪较少，年平均 SCD 小于 15 天。其他大部分区域 SCD 大于 30 天。而积雪覆盖日数高值（SCD>120 天）主要分布在高海拔山区，其中大部分分布在喀喇昆仑山、昆仑山北部、喜马拉雅山、唐古拉山中东部以及念青唐古拉山，小部分分布于巴颜喀拉山、祁连山和横断山西侧等地区。60 天 <SCD<120 天也主要分布在这些山脉附近。

根据“1980—2018 年 25 km 逐日雪深数据集”提取青藏高原 1980—2018 年的平均雪深，结果显示，青

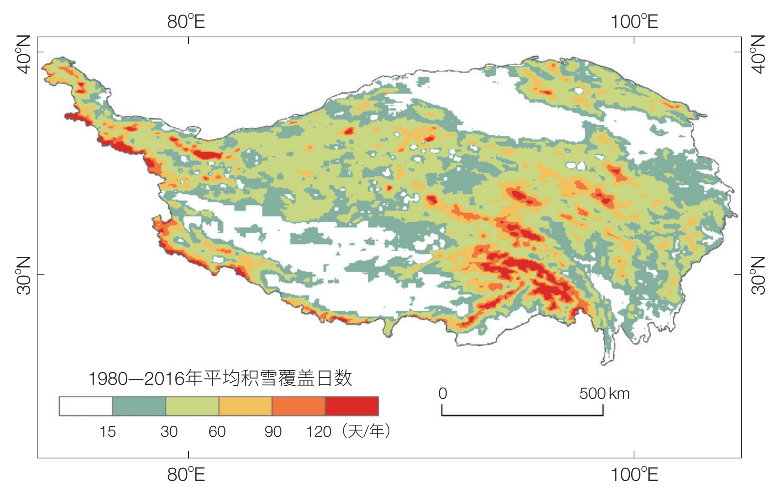


图 1　青藏高原 1980—2016 年多年平均积雪覆盖日数图

① https://www.ncdc.noaa.gov.
② https://nsdic.org.

藏高原积雪主要集中在横断山脉西侧、念青唐古拉山脉、喜马拉雅山、帕米尔高原、巴颜喀拉山以及祁连山地区（图 2），其空间分布格局与积雪覆盖日数分布格局基本一致。最大雪深分布在横断山脉西侧和念青唐古拉山，年平均雪深在 10 cm 以上；其次分布在巴颜喀拉山、喜马拉雅山及帕米尔高原；祁连山区相对其他几个山区雪深较浅；青藏高原腹地及柴达木盆地降雪次数较少，平均雪深在 1 cm 以内。

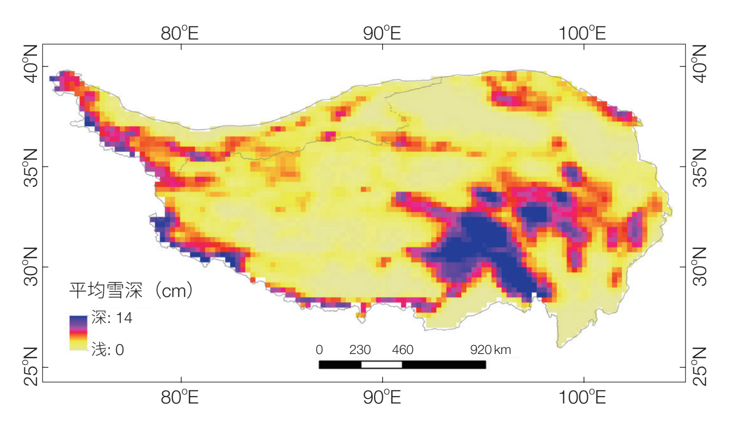


图 2　青藏高原 1980—2018 年多年平均雪深分布图

2 青藏高原积雪变化特征

为获取青藏高原积雪年际变化特征，提取了青藏高原 1980—2016 年每年的积雪面积及平均雪深，并分析了这 2 个参数的年际变化趋势以及变化趋势在空间上的分布特征。

积雪期（11月1日到次年的 3月31日）平均积雪面积和最大、最小面积显示，总体上 20 世纪 80—90年代积雪面积较大，2000 年以后，青藏高原积雪面积显著减少（图 3）。平均值有4个峰值，分别出现在1980/1981 年积雪期（1.15×10^6 km^2）、1982/1983 年积雪期（9×10^5 km^2）、1994/1995 年积雪期（8.1×10^5 km^2）、1997/1998 年积雪期（6.9×10^5 km^2），这 4 个时期的平均积雪面积分别为 5.8×10^5 km^2、4.8×10^5 km^2、1.7×10^5 km^2、1.2×10^5 km^2。最大值出现在 1994/1995 积雪期，接近 2.5×10^6 km^2。

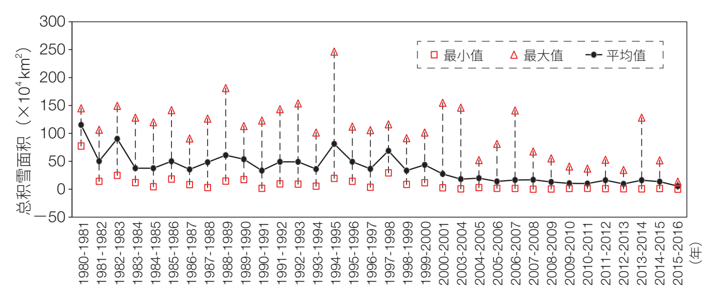


图 3　青藏高原积雪 1980/1981—2015/2016 年积雪期积雪面积变化趋势图

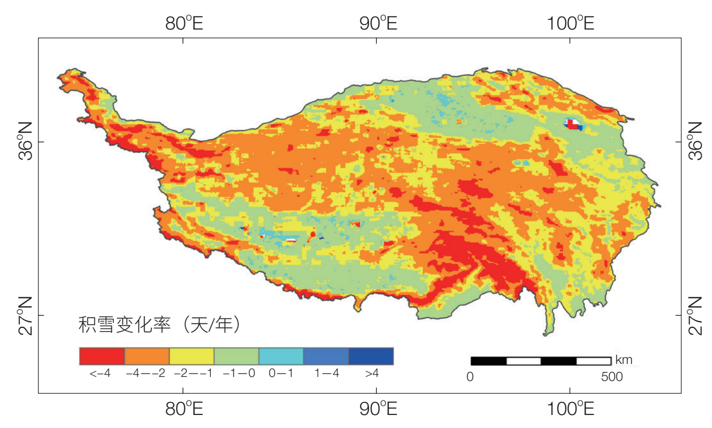


图 4　青藏高原 1980/1981—2015/2016 年积雪覆盖日数变化分布图

青藏高原逐年积雪日数及其变化的空间分布表明，除了青藏高原北部的柴达木盆地和西南部冈底斯山脉和唐古拉山脉之间的降雪较少区域出现零星的降雪增加趋势外，青藏高原大部分区域积雪日数呈逐年递减的趋势（图 4）。变化趋势小于 −2 天/年的区域约占整个青藏高原面积的 1/2。在喀喇昆仑山、昆仑山东段、唐古拉山东段、念青唐古拉山、喜马拉雅山东段，甚至出现小于 −4天/年的下降趋势。由此说明从 20 世纪 80 年代至今，整个青藏高原的积雪日数出现大规模的降低。

青藏高原年平均雪深及其年际变化显示，1980—2018 年，青藏高原雪深呈现总体下降趋势（图 5）。2000 年之前雪深呈现较大的波动，从 2000 年开始雪深出现明显的下降，并且波动较小。从 2000 年开始出现显著下降，这一结论与积雪面积的年际变化趋势（图 3）相似。虽然总体上呈下降趋势，但也存在一定的空间异质性（图 6）。雪深较深的念青唐古拉

山区呈明显的下降趋势，变化率主要分布在 –0.2—–0.1 cm/a，而祁连山、可可西里山以及喜马拉雅山北坡的积雪呈现小的上升趋势，变化率小于 0.1 cm/a。

3 青藏高原积雪变化的气候效应

相比高纬度地区，青藏高原的积雪覆盖率和积雪日数相对较小，但由于处于低纬度高海拔区域，接收的太阳辐射很强。因此，青藏高原的积雪变化会强烈地改变局地和区域的能量平衡，对气候系统产生重要的影响。

洁净新雪的反照率可超过 0.9，而裸地反照率一般小于 0.3。因此，气候变暖引起的积雪面积和积雪日数减少会导致地表反照率降低，地面吸收更多的太阳辐射，地面温度进一步升高，导致积雪进一步消融。这一过程被定义为积雪反照率反馈，积雪在单位面积上对辐射平衡的改变量被称为积雪辐射强迫。积雪的正反馈作用可以放大积雪对气候系统的响应，加速气候变暖的进程。有研究表明，北半球中、高纬度地区的升温幅度大于热带地区的一个可能原因就是雪冰反照率反馈[5,6]。

通过积雪覆盖率数据、气温、大气层顶的短波辐射、积雪反照率与地表反照率数据对青藏高原 2001—2010 年的积雪辐射强迫进行估算（图 7）。结果发现，青藏高原内积雪较多的山脉地区对应着较大的积雪辐射强迫。其中喀喇昆仑山、喜马拉雅山脉附近地区的积雪辐射强迫可超过 15 W m^{-2}；青藏高原北部的昆仑山、可可西里山脉，中部的唐古拉山脉，南部的念青唐古拉山脉，以及东北边缘的祁连山脉的积雪辐射强迫介于 10—15 W m^{-2}。整个青藏高原的年平均辐射强迫为 4.21 W m^{-2}。也就是说，2001—2010 年，积雪的存在使青藏高原在每平方米面积上吸收的太阳辐射平均减少了 4.21 W。

基于青藏高原 2001—2010 年积雪辐射强迫及 10 年来的升温情况，计算得到了青藏高原的积雪反照率反馈为 9.35 W m^{-2} ℃$^{-1}$。意思是平均地表温度每上升 1℃，积雪消融会导致每平方米多吸收 9.35 W 的能量。这一数值远高于北半球平均积雪反照率反馈（约0.18±0.08 W m^{-2} ℃$^{-1}$）[7]。从而也说明青藏高原的积雪对气候系统的影响不容小觑，对青藏高原积雪的动态监测及其对气候系统的响应与反馈研究具有重要

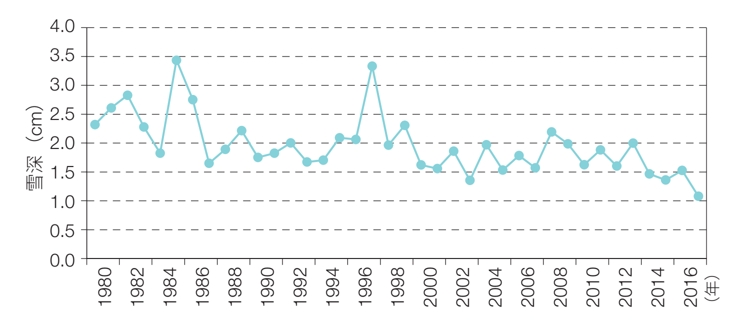


图 5　1980/1981—2017/2018 年青藏高原年平均雪深年际变化曲线图

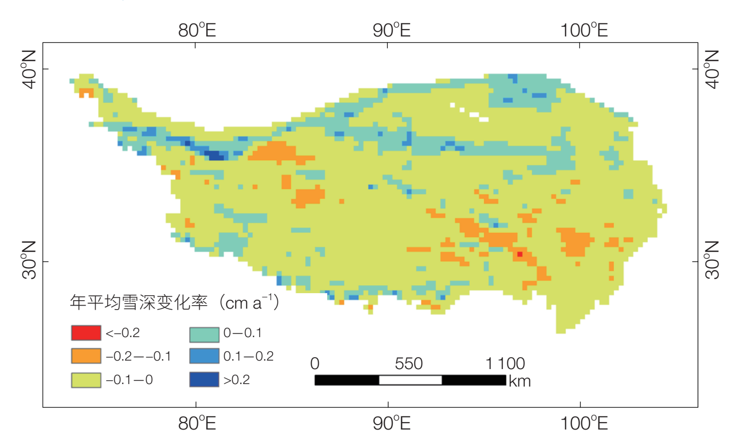


图 6　青藏高原 1980/1981—2017/2018 年平均雪深年际变化率分布图

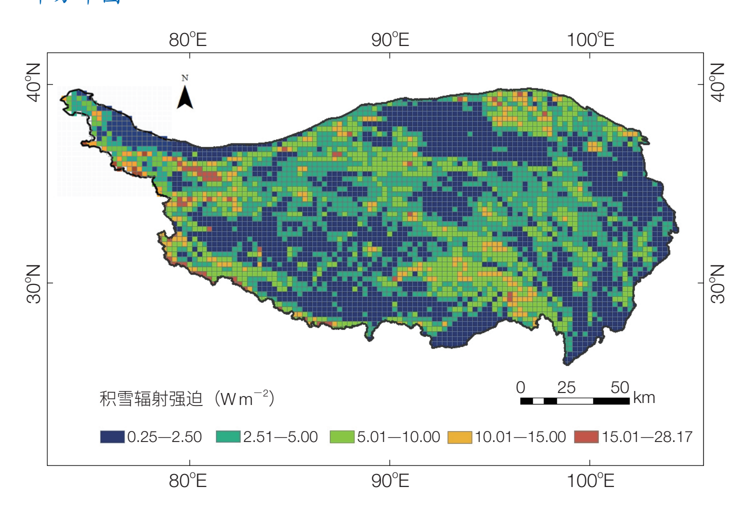


图 7　青藏高原 2001—2010 年平均积雪辐射强迫

的意义。

4 青藏高原积雪变化的水文效应

积雪年内的积累和消融过程是青藏高原水文循环的重要组成部分，融雪补给提供了上千万人的淡水资源，突然的大型融雪过程也会产生融雪型洪水，造成灾害。典型的积雪消融过程包括积累期、融雪前期和融雪期。积累期，积雪基本以升华和风吹雪 2 种形式损耗和迁移，径流以基流为主，变化小。融雪前期，积雪损耗主要表现为蒸发与融化。一天之中气温较高时有融雪出现，形成“坡面漫流”，但总体上温度相对较低，不足以形成大规模的融雪径流。融雪期，积雪消融较快，径流流速和水深突然加大，山间出现漫流[8]。

青藏高原不同区域融雪特点各异。例如在海拔较高、纬度较低的地区，年内任何季节都可能降雪，因而消融没有明显的季节性。这使得融雪过程观测与模拟更为困难。因此，通常利用地面与遥感观测标定和改进过的水文模型来研究流域尺度的融雪过程。几个典型的流域研究表明，积雪消融产生的融水在径流中占比具有明显差异。雅鲁藏布江及其支流，冰雪融水补给比重可占到径流比重的 9.7%[9]。在长江河源区，河流特征主要为以降水为主的混合补给型。该区流域海拔高，冰川及冻土发育，积雪多以斑状积雪分布，冰雪融水占到径流比重的 13.6%[10]。祁连山黑河上游约 16.1%[11]，这与不同流域的积雪发育以及水热差异有关。尽管融雪在总径流中的占比并不算大，但是融雪的峰值一般出现在春季末期，正是农业灌溉的黄金时期，也是自然植被生长的关键期，融雪对土壤水分和河川径流的补给无疑是至关重要的。

气候变化对青藏高原地区积雪水文过程影响显著。近年来，针对青藏高原地区积雪水文的研究一致发现融雪径流增加和融雪峰值前移的现象[1,12-14]。气候模式的研究进一步表明[15]，在喜马拉雅山区，受空气湿度的影响，径流对气候变化的响应存在区域差异，东部流域降雪的增加将减缓径流的增加速率，同时推迟径流峰值出现的时间。

5 青藏高原牧区雪灾

青藏高原牧区雪灾发生频率高，地域分布广，呈 10 年一大灾、5 年一中灾、年年有小灾的规律。其中，西藏北部的那曲地区、阿里地区和藏南的日喀则地区，青海玉树州、果洛州、海南州、黄南州南部，以及甘肃甘南州、天祝县等牧区，都是雪灾的多发区，占青藏高原牧区面积的 60% 以上[16]。雪灾对高原特色畜牧业生产造成极大的危害，成为冬春季最为严重的自然灾害。

根据长时间气象观测数据分析青藏高原地区雪灾发生频次，结果显示，20 世纪 90 年代最为严重，西藏高原 2000 年以后略有减少，而青海高原仍然有所增加[17-19]。从灾害学角度研究出发，不仅需要考虑致灾因子，还需要考虑承灾体。综合研究表明 2000 年以来青藏高原基本没有发生特大雪灾，一方面原因是 2000 年以来积雪略有减少，另一个重要的因素是国家加强了青藏高原牧区雪灾防护措施（如温棚），气象灾害预报服务也起到了关键作用，使得牧区对雪灾抵抗能力增强、脆弱性降低[20]。因此，从气象致灾力、承灾体和牧区抗灾力方面，结合高原草地畜牧业生产与雪灾特点，建立健全雪灾预警与防护系统，对提高青藏高原牧区雪灾的防灾抗灾能力、维护社会经济可持续发展，具有重要的科学意义和实际应用价值。

6 结语

青藏高原积雪分布具有较大的空间异质性，稳定积雪主要分布在高山区。近 30 多年来，青藏高原积雪出现较大的年际波动并伴有减少趋势，其中积雪覆盖日数减少明显，2000 年之后雪深减少明显。虽然青藏高原积雪较浅，但是其产生的辐射强迫比高纬

度地区更为重要。积雪融水是春季重要的水资源，随着积雪减少，融雪对水资源的贡献产生重要的影响。受气象因子产生的雪灾出现频次和强度有所增加，需进一步加强牧区雪灾的预警和防御能力，减少实际损失。

参考文献

1 Immerzeel W W, van Beek L P H, Bierkens M F P. Climate change will affect the Asian Water Towers. Science, 2010, 328 (5984): 1382-1385.

2 Dai L, Che T, Ding Y. Inter-calibrating SMMR, SSM/I and SSMI/S data to improve the consistency of snow-depth products in China. Remote Sensing, 2015, 7(6): 7212-7230.

3 Hao X, Luo S, Che T, et al. Accuracy assessment of four cloud-free snow cover products over the Qinghai-Tibetan Plateau. International Journal of Digital Earth, 2019, 12(4): 375-393.

4 Che T, Li X, Jin R, et al. Snow depth derived from passive microwave remote-sensing data in China. Annals of Glaciology, 2008, 49: 145-154.

5 Kay J, Holland M, Jahn A. Inter-annual to multi-decadal Arctic sea ice extent trends in a warming world. Geophysical Research Letter, 2011, 38: L15708.

6 Graversen R, Wang M. Polar amplification in a coupled climate model with locked albedo. Climate Dynamics, 2009, 33(5): 629-643.

7 Xiao L, Che T, Chen L, et al. Quantifying Snow Albedo Radiative Forcing and Its Feedback during 2003-2016. Remote Sensing, 2017, 9(9): 1-15.

8 李弘毅, 王建, 白云洁, 等. 黑河上游冰沟流域典型积雪期水文情势. 冰川冻土, 2009, 31(2): 293-300.

9 Chen X, Long D, Hong Y, et al. Improved modeling of snow and glacier melting by a progressive two-stage calibration strategy with GRACE and multisource data: How snow and glacier meltwater contributes to the runoff of the Upper Brahmaputra River basin?. Water Resource Research, 2017, 53(3): 2431-2466.

10 Han P, Long D, Han Z, et al. Improved understanding of snowmelt runo from the headwaters of China's Yangtze River using remotely sensed snow products and hydrological modeling. Remote Sensing of Environment, 2019, 224: 44-59.

11 Li H, Li X, Yang D, et al. Tracing snowmelt paths in an integrated hydrological model for understanding seasonal snowmelt contribution at basin scale. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2019, 124: 8874-8895.

12 Liu T, Willems P, Pan X L, et al. Climate change impact on water resource extremes in a headwater region of the Tarim basin in China. Hydrology and Earth System Sciences, 2011, 15(11): 3511-3527.

13 Wang J, Li H, Hao X. Responses of snowmelt runoff to climatic change in an inland river basin, Northwestern China, over the past 50 years. Hydrology and Earth System Sciences, 2010, 14(10): 1979-1987.

14 Wang J, Li S. Effect of climatic change on snowmelt runoffs in mountainous regions of inland rivers in Northwestern China. Science in China Series D: Earth Sciences, 2006, 49(8): 881-888.

15 Rees H G, Collins D N. Regional differences in response of flow in glacier-fed Himalayan rivers to climatic warming. Hydrological Processes, 2006, 20 (10): 2157-2169.

16 冯学智，曾群柱, 陈贤章, 等. 西藏那曲雪灾的遥感监测研究//中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊（第8号）. 北京: 科学出版社, 1995: 14-22.

17 郭晓宁, 李林, 刘彩红, 等. 青海高原1961—2008年雪灾时空分布特征. 气候变化研究进展, 2010, 6(5): 332-337.

18 张涛涛，延军平，廖光明, 等. 近51a青藏高原雪灾时空分布特征. 水土保持通报, 2014, 34(1): 242-245.

19 黄晓清, 唐叔乙, 次旺顿珠. 气候变暖背景下西藏高原雪灾变化及其与大气环流的关系. 高原气象, 2018, 37(2): 325-

332.

20 Wang S, Zhou L, Wei Y. Integrated risk assessment of snow disaster over the Qinghai-Tibet Plateau, Geomatics. Natural Hazards and Risk, 2019, 10(1): 740-757.

Snow Cover Variation and Its Impacts over the Qinghai-Tibet Plateau

CHE Tao[1,2*] HAO Xiaohua[1] DAI Liyun[1] LI Hongyi[1] HUANG Xiaodong[3] XIAO Lin[4]

（1 Key Laboratory of Remote Sensing of Gansu Province, Heihe Remote Sensing Experimental Research Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2 CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Beijing 100101, China;

3 Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

4 Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China）

Abstract Snow cover over the Qinghai-Tibet Plateau (QTP) is a key element of Asian Water Tower. It is also an important indicator of weather and climate change. Its spatio-temporal changes can influence the regional climate and ecosystem. In this study, the spatio-temporal distribution and trends of snow cover were analyzed based on remote sensing data, and its hydrological and climate effects were also explored. The results show the followings: (1) Snow cover was dominantly distributed in mountainous areas, and the largest snow depth and Snow Cover Days (SCD) were found in the Dangla and Nianqing Dangla Mountains, with the average SCD of over 120 days, and annual average snow depth of over 10 cm; whilst there was few snow cover in the plain area and Qaidam Basin, e.g. ephemeral snow cover, with average SCD of less than 15 day and annual snow depth of less than 1 cm. (2) Snow cover days and depth were decreased in the period of 1980–2018, especially after the year of 2000. (3) There was large radiative forcing in the mountainous areas with deep snow and large SCD, and the maximum value beyond 15 W m^{-2}; thus, the snow cover over QTP plays important feedbacks to the climate system. (4) The QTP is the source of runoff in headwater regions of many rivers, and snow melt water contributed to the soil moisture and river runoff in spring. (5) The frequency of snow disaster was increased by extreme weather events, and early warning system and protective measures should be enhanced to minimize the loss caused by snow disaster.

Keywords Qinghai-Tibet Plateau (QTP), snow cover, water resources, climate change, snow disaster



车 涛 中国科学院西北生态环境资源研究院遥感与地理信息科学研究室副主任、研究员，中国科学院黑河遥感试验研究站站长。主要从事冰冻圈遥感研究。发表研究论文100余篇，获省部级科技成果奖一等奖2项。E-mail: chetao@lzb.ac.cn

CHE Tao Professor of Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences (CAS). He is currently serving as the Deputy Director of Laboratory of Remote Sensing and Geospatial Science and the Director of Heihe Remote Sensing Experimental Research Station, CAS. His research focuses on remote sensing of cryosphere. He published more than 100 refereed journal articles and obtained 2 scientific awards at the ministerial and provincial levels. E-mail: chetao@lzb.ac.cn

* Corresponding author

■责任编辑：文彦杰

参考文献（双语版）

1 Immerzeel W W, van Beek L P H, Bierkens M F P. Climate change will affect the Asian water towers. Science, 2010, 328 (5984): 1382-1385.

2 Dai L Y, Che T, Ding Y J. Inter-calibrating SMMR, SSM/I and SSMI/S data to improve the consistency of snow-depth products in China. Remote Sensing, 2015, 7(6): 7212-7230.

3 Hao X H, Luo S Q, Che T, et al. Accuracy assessment of four cloud-free snow cover products over the Qinghai-Tibetan Plateau. International Journal of Digital Earth, 2019, 12(4): 375-393.

4 Che T, Li X, Jin R, et al. Snow depth derived from passive microwave remote-sensing data in China. Annals of Glaciology, 2008, 49: 145-154.

5 Kay J, Holland M, Jahn A. Inter-annual to multi-decadal Arctic Sea ice extent trends in a warming world. Geophysical Research Letters, 2011, 38(15): L15708.

6 Graversen R G, Wang M H. Polar amplification in a coupled climate model with locked albedo. Climate Dynamics, 2009, 33(5): 629-643.

7 Xiao L, Che T, Chen L, et al. Quantifying snow albedo radiative forcing and its feedback during 2003-2016. Remote Sensing, 2017, 9(9): 883.

8 李弘毅, 王建, 白云洁, 等. 黑河上游冰沟流域典型积雪期水文情势. 冰川冻土, 2009, 31(2): 293-300.

Li H Y, Wang J, Bai Y J, et al. The snow hydrological processes during a representative snow cover period in Binggou watershed in the upper reaches of Heihe River. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31(2): 293-300. (in Chinese)

9 Chen X, Long D, Hong Y, et al. Improved modeling of snow and glacier melting by a progressive two-stage calibration strategy with GRACE and multisource data: How snow and glacier meltwater contributes to the runoff of the Upper Brahmaputra River basin?. Water Resources Research, 2017, 53(3): 2431-2466.

10 Han P, Long D, Han Z, et al. Improved understanding of snowmelt runo from the headwaters of China's Yangtze River using remotely sensed snow products and hydrological modeling. Remote Sensing of Environment, 2019, 224: 44-59.

11 Li H Y, Li X, Yang D W, et al. Tracing snowmelt paths in an integrated hydrological model for understanding seasonal snowmelt contribution at basin scale. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2019, 124(16): 8874-8895.

12 Liu T, Willems P, Pan X L, et al. Climate change impact on water resource extremes in a headwater region of the Tarim Basin in China. Hydrology and Earth System Sciences, 2011, 15(11): 3511-3527.

13 Wang J, Li H, Hao X. Responses of snowmelt runoff to climatic change in an inland river basin, northwestern China, over the past 50 years. Hydrology and Earth System Sciences, 2010, 14(10): 1979-1987.

14 Wang J, Li S. Effect of climatic change on snowmelt runoffs in mountainous regions of inland rivers in northwestern China. Science in China Series D: Earth Sciences, 2006, 49(8): 881-888.

15 Rees H G, Collins D N. Regional differences in response of flow in glacier-fed Himalayan rivers to climatic warming. Hydrological Processes, 2006, 20 (10): 2157-2169.

16 冯学智，曾群柱, 陈贤章, 等. 西藏那曲雪灾的遥感监测研究// 中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊（第8号）. 北京: 科学出版社, 1995: 14-22.

Feng X Z, Zeng Q Z, Chen X Z, et al. Remote sensing monitoring of Nagqu snow disaster in Tibet// Bulletin of Lanzhou Institute of Glaciology and Cryopedology, Chinese Academy of Sciences (No. 8). Beijing: Science Press, 1995: 14-22. (in Chinese)

17 郭晓宁, 李林, 刘彩红, 等. 青海高原1961—2008年雪灾时空分布特征. 气候变化研究进展, 2010, 6(5): 332-337.
Guo X N, Li L, Liu C H, et al. Spatio-temporal distribution of snow disaster in Qinghai plateau during 1961—2008. Advances in Climate Change Research, 2010, 6(5): 332-337. (in Chinese)

18 张涛涛, 延军平, 廖光明, 等. 近51a青藏高原雪灾时空分布特征. 水土保持通报, 2014, 34(1): 242-245.
Zhang T T, Yan J P, Liao G M, et al. Spatiotemporal distribution of snow disaster on Tibetan Plateau in recent 51 years. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(1): 242-245. (in Chinese)

19 黄晓清, 唐叔乙, 次旺顿珠. 气候变暖背景下西藏高原雪灾变化及其与大气环流的关系. 高原气象, 2018, 37(2): 325-332.
Huang X Q, Tang S Y, Ciwang D Z. Variation of the snow disasters under global warming and its relationship with general circulation over Tibetan Plateau. Plateau Meteorology, 2018, 37(2): 325-332. (in Chinese)

20 Wang S J, Zhou L Y, Wei Y Q. Integrated risk assessment of snow disaster over the Qinghai-Tibet Plateau, Geomatics. Natural Hazards and Risk, 2019, 10(1): 740-757.